

20. Об оптимальной конструкции фурм и стойкости огнеупорных изделий для них при продувке доменного чугуна / Д.А. Лубяной, В.Г. Переходов, А.Г. Черепанов, Ю.А. Арканова [и др.] // Новые огнеупоры. 2017. № 3. С. 71–72.

УДК 669:536

**В. И. Матюхин<sup>1</sup>, Ю. Г. Ярошенко<sup>1</sup>, А. В. Матюхина<sup>1</sup>, В. А. Дудко<sup>1</sup>, С.Е. Пуненков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия;

<sup>2</sup> ОАО «Ураласбест», г. Екатеринбург, Россия

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА В ШАХТНЫХ ПЕЧАХ ВАГРАНОЧНОГО ТИПА**

### **Аннотация**

*С целью сокращения расхода кокса в шахтной печи ваграночного типа с открытым или закрытым колошником дополнительно используют природный газ. Его сжигание с помощью горелочных устройств обычно осуществляют в выносных топках, установленных по периметру кожуха печи. В зависимости от конструкции, горелки обеспечивают частичное или полное предварительное перемешивание газа и воздуха при коэффициенте расхода воздуха 1,2–1,5. Далее продукты горения газа подают непосредственно в слой шихты. При реализации этого способа расход кокса составил 8–9% к металлозавалке, а расход газообразного топлива 30–40 м<sup>3</sup>/т расплава. Для этих условий было отмечено незначительное повышение температуры расплава (на 10–20 °С), рост производительности на 15–20% при снижении объема газообразных вредных выбросов на 20–25% (в основном СО). В работе вагранки наблюдали периодические нарушения газодинамического режима с подвисанием слоя шихтовых материалов, похолодание получаемого расплава, увеличение химического недожога и ухудшение условий службы футеровочных материалов.*

*При использовании слоевого способа сжигания газозовоздушной смеси ее подают в разогретый слой кусковых материалов с коэффициентом расхода воздуха не ниже 2,5–3,0 с формированием высокотемпературной зоны при температуре 1350–1380 °С, шириной 60–70 мм, способной перемещаться по слою со скоростью 15–20 мм/мин. Для его реализации в плотном продуваемом слое необходимо обеспечить равномерное перемешивание газа и воздуха, требуемые газодинамические условия и создание заданного соотношения «газ-воздух» при коэффициенте расхода воздуха более 2,5–3,0.*

*При подаче холодной газозовоздушной смеси в слой шахтных печей через фурмы зона горения делит весь слой на две ступени: первоначальную и конечную. Высокий температурный уровень зоны горения обеспечивает значительную скорость охлаждения материалов на стадии зажигания газозовоздушной смеси, что предотвращает ее воспламенение в свободном надслоевом пространстве. Отсутствие прямого контакта зоны высоких температур с рабочим пространством агрегата повышают надежность и экономичность использования этого процесса (отсутствуют тепловые потери).*

*Применение слоевого способа сжигания природного газа для отопления чугунолитейной вагранки обеспечивает повышение производительности плавильного агрегата с 10 до 13,6 т/ч или на 36 % при сокращении удельного расхода кокса на 80 кг/т или на 33,3 %, уменьшении общего расхода теплоты на процесс на 25 кВт или 18,78 % и потерь тепла с отходящими газами на 25,32 кВт или 16,2 %. При этом общий тепловой КПД агрегата увеличился с 35,58 до 42,26 % или на 15,81 %.*

*Ключевые слова: шахтная печь, выносные топки, коксогозовое отопление, условия сжигания газо-воздушной смеси, зоны горения твердого и газообразного видов топлива, расход кокса, производительность.*

## Abstract

*With the aim of reducing coke consumption in a shaft furnace of the type cupola with an open or closed furnace top additionally use natural gas. Burning using burner devices are typically involved in the external furnaces installed around the perimeter of the furnace shell. Depending on design, the burners provide a partial or complete pre-mixing gas and air at air flow rate of 1.2 to 1.5. Further, the combustion gas is fed directly to a layer of the charge. When implementing this method, the coke consumption was 8–9% metallizable and fuel gas consumption 30–40 m<sup>3</sup>/t of melt. For these conditions, it was observed a slight increase in the temperature of the melt (10–20°C), productivity growth 15–20% while reducing the amount of harmful gaseous emissions by 20–25% (mostly WITH). In the cupola observed at the periodic violations of gas-dynamic regime freezing of the layer of charge materials, cooling the obtained melt, the increase in chemical underburning and the deterioration of the conditions of service of lining materials.*

*When using the layered method for the combustion of the gas mixture it is fed into the heated layer of bulk materials with the air flow rate is not below 2.5–3.0 with formation of a high-temperature zone at a temperature of 1350–1380 °C, width of 60–70mm, able to move through the layer at a speed of 15–20mm/min, To implement it in thick ventilated layer is necessary to ensure uniform mixing of gas and air required by the gas-dynamic conditions and the establishment of a set ratio "gas-air" in the air flow rate more than 2.5 and 3.0.*

*When applying cold gatavosanas mixture in a layer of furnaces via the tuyere combustion zone divides the whole layer into two stages: initial and final. The high temperature level of the combustion zone provides substantial cooling rate of the materials at the stage of ignition of the gas mixture, which prevents it from fire in free nasleema space. The absence of direct contact of the zone of high temperatures with a working space of the unit increase the reliability and efficiency of this process (no heat losses).*

*The use of the layered method of burning natural gas to heat the cast iron cupola increase the productivity of the melting unit 10 to 13.6 t/h, or 36% while reducing specific consumption of coke for 80 kg/t or 33.3%, decrease in the total consumption of heat for the process at 25kW or of 18.78% and heat losses in the exhaust gases by 25.32 kW, or 16.2%. The overall thermal efficiency of the unit increased from 35.58 to 42,26% or by 15.81%.*

*Key words: shaft furnace, external furnace, coke oven heating, combustion conditions of the gas-air mixture, combustion of solid and gaseous fuels, coke consumption, productivity.*

Одним из наиболее распространенных агрегатов для получения жидкого расплава (чугуна, минерального расплава и др.) является вагранка с открытым или закрытым колошником. Ее работа отличается возможностью широкого и относительно простого регулирования производительности, универсальностью применяемого исходного сырья по химическому составу, высоким тепловым КПД, простотой конструкции и легкостью управления процессом [1]. В коксовой вагранке, работающей в режиме противотока, выделение теплоты, необходимой для нагрева и плавления исходных материалов, а также протекания основных физико-химических процессов, происходит в верхней части холостой колоши (коксовой колоше) над фурмами [2].

Как показывает практика эксплуатации вагранок [3, 4], управление процессами в них осуществляют преимущественно на основании закономерностей процессов тепломассообмена и газодинамики. Чем лучше контакт газа и материалов между собой при их движении, тем эффективнее процесс теплопередачи между ними. Рациональные условия для этого могут быть достигнуты только в том случае, если каждая единица твердых компонентов в слое будет активно обрабатываться продуктами горения топлива. В этом и состоит одна из основных задач технологии нагрева шихты в вагранках.

В вагранках, работающих на коксе, цена этого топлива может достигать 70% себестоимости производимой продукции. В условиях возрастающего дефицита металлургического кокса и его цены все большее значение приобретают технические разработки по частичной замене кокса более дешевыми газообразным и жидким видами топлива, а также создания эффективных способов их сжигания.

Одним из способов реализации теплового режима работы вагранки, ведущего к экономии дефицитного кокса, является способ, связанный с использованием в качестве дополнительного топлива – природного газа. Подачу газоз-воздушной смеси организуют через выносные топки (рис. 1, поз. 2) с горелочными устройствами (рис. 1, поз. 3), установленными по периметру кожуха агрегата. В зависимости от конструкции, горелки обеспечивают частичное или полное предварительное смешение газа и воздуха при коэффициенте расхода воздуха 1,2–1,5. Продукты горения газа и кислорода воздуха, не успевшего принять участие в горении газа, поступают непосредственно в слой кокса, обеспечивая его дополнительно сгорание. За счет улучшения горения твердого топлива выделяется дополнительная теплота, что сопровождается повышением температуры компонентов шихты. Повышенные температуры в вагранках с коксогозовым отоплением (рис. 1, б) занимают больший объем рабочего пространства печи в сравнении с чисто коксовым отоплением, что улучшает условия тепловой обработки компонентов шихты в области высоких температур.

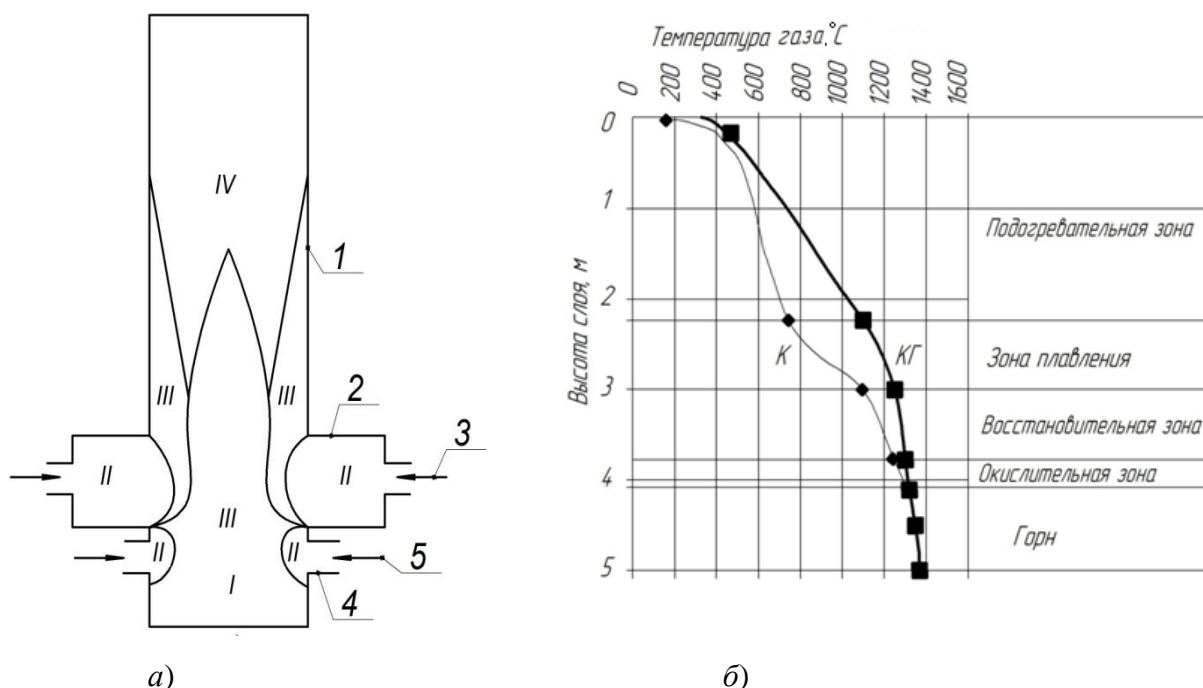


Рис. 1. Распределение тепловых зон (а) и температур газов (б) при коксовом (К) и коксо-газовом (КГ) отоплении шахтных печей:

I – горн; II – окислительная зона; III – восстановительная зона;

IV – подогревательная зона; 1 – шахта; 2 – выносная топка;

3 – подача газоз-воздушной смеси; 4 – фурма; 5 – подача воздушного дутья

В подобной организации работы вагранок есть и негативные особенности. Пониженная концентрация кислорода в составе продуктов горения природного газа [5, 6] и расширение протяженности зоны повышенных температур в слое открывают возможность [7, 8] для интенсификации восстановления диоксида углерода газа углеродом кокса с поглощением теплоты, увеличением удельного выхода газов и понижением их средней температуры. В продуктах горения появляется дополнительное количество CO и H<sub>2</sub>, что сокращает эффективность использования кокса. Чтобы не допустить поступление кислорода газоз-воздушной смеси в слой шихты, длина выносных топок должна обеспечивать завершенность процесса факельного сжигания газообразного топлива и составлять не менее 1,0–1,5 м [9]. Выносные топки такой длины существенно усложняют обслуживание горна во время выпуска металла и фурм в процессе работы вагранки.

В ряде случаев при коксогозовом отоплении шахтных печей с использованием выносных топок наблюдались нарушения газодинамического режима их работы, которые выражались в

подвисянии слоя, похолодании расплава, увеличении химического недожога, ухудшении условий работы футеровочных материалов. Ограниченная стойкость выносных топок при работе с повышенной температурой существенно сокращает срок их службы, увеличивая затраты на обслуживание плавильного агрегата.

Полная замена кокса газообразным топливом с использованием выносных топок связана в первую очередь с проблемами обеспечения равномерного контакта нагреваемых материалов с газом [5]. В противном случае не удастся достичь эффективного нагрева и плавления шихты, а также перегрева получаемого расплава. В связи с этим общий расход теплоты в вагранках, использующих, например, природный газ, по сравнению с аналогичным показателем работы вагранки на коксовом отоплении возрастает примерно в 5–8 раз [10, 11]. Для обеспечения удовлетворительных технико-экономических и экологических показателей работы вагранок только на газообразном топливе ограничивают их производительность до уровня 1,5–2,0 т/ч.

Повышение эффективности использования газообразного топлива в вагранках может быть достигнуто при его сжигании непосредственно в плотном слое. В лабораторных и в промышленных условиях работы слоевых установок было показано, что отличительной особенностью слоевого способа сжигания газообразного топлива является возможность его осуществления в плотном слое кусковых материалов практически любого химического состава с коэффициентом расхода воздуха как большим, так и меньшим единицы [12]. Правильное установление величины коэффициента расхода воздуха позволяет обеспечивать требуемые температурные условия тепловой обработки различных участков слоя. Так как процесс горения газа протекает внутри слоя, вне контакта с футеровкой агрегата, то при этом снижаются общие тепловые потери агрегата.

Механизм горения газообразного топлива достаточно полно описан в технической литературе [11, 17, 18]. Поэтому следует остановиться лишь на тех особенностях реализации технологии выплавки чугуна в вагранке, которые возникают при сжигании природного газа непосредственно в слое шихты. Сжигание природного газа в плотном слое кускового материала должно обеспечить:

- сохранение температурно-временных условий для протекания окислительно-восстановительных и плавильных процессов непосредственно в слое шихты;
- выполнение технологических требований к качеству получаемого чугуна;
- снижение удельного расхода дорогостоящего кокса;
- снижение вредных выбросов парниковых газов в окружающую среду.

Промышленные испытания использования слоевого способа сжигания природного газа производили на чугунолитейной вагранке со средней производительностью 10 т/ч ОАО «Синарский трубный завод» (Свердловская обл.). В период испытаний химический состав чугуна соответствовал содержанию, %: Si=2,57; Mn=0,53; P=0,076; S=0,047; C=3,64; Cr=0,068. В качестве основного топлива при ваграночной плавке использовали кокс марки КЛ–1 состава: 5 % влаги, 12,0 % золы, 0,6 % серы, 1,2 % летучих. Химический состав золы кокса представлен следующими компонентами, %: SiO<sub>2</sub>=53,0; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а состав его летучих, %: CO<sub>2</sub>=35,0; CO=37,0; CH<sub>4</sub>=4,0; H<sub>2</sub>=6,0; N<sub>2</sub>=18,0. Природный газ включал следующие компоненты, %: CH<sub>4</sub>= 98,0; C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>= 0,1; CO<sub>2</sub>=0,3 и N<sub>2</sub>=1,6. В состав флюса – известняка, входили, %: CaO=52,0; SiO<sub>2</sub>=1,75; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> =1,0; FeO=1,0; FeS=0,2; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=0,02. В качестве составляющих металлошихты были представлены: отходы собственного производства, покупной чугунный лом, стальной ломом трубного производства, ферросилиций марки ФС45 и ферромарганций марки ФМн70.

Расход дутьевого холодного воздуха составлял около 10 000–10 500 м<sup>3</sup>/ч при содержании в нем влаги до 9 г/м<sup>3</sup>. Футеровка вагранки выполнялась из кислых огнеупоров (шамот), содержащих 60 % SiO<sub>2</sub>, 36 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2 % CaO и 2 % MgO. При использовании природного газа для получения примерно одинакового состава чугуна для связывания кислых окисленных компонентов плавки повышали основность шихты с 0,69 до 0,74.

Подвод природного газа к вагранке осуществляли от отдельного газопровода через распределительный коллектор на газовое распределительное сопло, из которого природный

газ поступал в поток воздушного дутья, направляемого для горения кокса (рис.2). Регулирование расхода газа на каждую фурму осуществляли пробковым краном.

Режим слоевого сжигания природного газа характеризовался следующими показателями:

- расходом природного газа на одну фурму не более  $25 \dots 30 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- расходом воздушного дутья на одну фурму до  $1250 \dots 1300 \text{ м}^3/\text{ч}$
- средним коэффициентом расхода воздуха при подаче в зажженный слой кокса – не ниже  $5,0 \dots 6,0$ ;
- общим расходом природного газа на вагранку – не выше  $200 \dots 250 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- общим расходом воздушного дутья – не более  $10000 \dots 10500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- скоростью выхода газо-воздушной смеси из фурм в слой –  $35 \dots 50 \text{ м/с}$ ;
- давлением природного газа – не ниже  $0,3 \text{ атм.}$ ;
- давлением воздушного дутья – не выше  $0,22 \text{ атм.}$

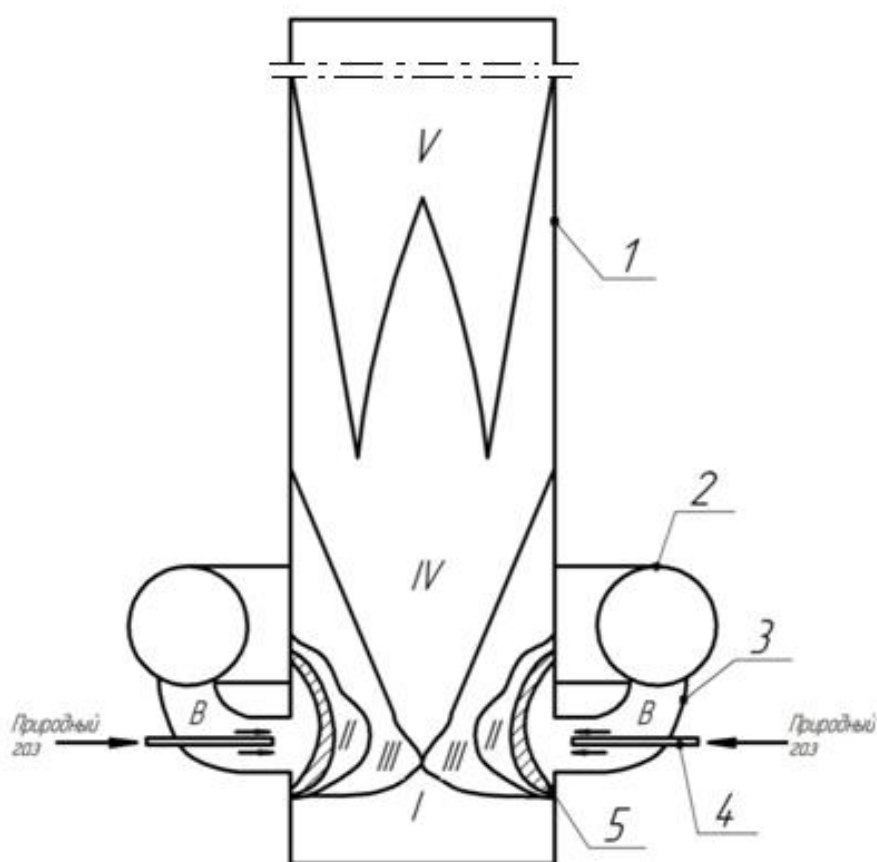


Рис. 2. Схема работы шахтной печи с использованием комбинированного топлива:

- 1 – шахта; 2 – воздушный распределительный коллектор; 3 – воздушная фурма;  
 4 – газовое сопло; 5 – зона горения газовой смеси; I – зона горна;  
 II – зона горения кокса; III – окислительная зона горения кокса и природного газа;  
 IV – восстановительная зона; V – подогревательная зона; В – воздушное дутье

Для поддержания заданных технологических параметров и обеспечения подачи добавок природного газа в зажженный слой кокса чугунолитейной вагранки были предусмотрены элементы автоматики, включающие контроль и регулирование расхода и давления воздушного дутья, природного газа.

Использование комбинированного топлива при ваграночной плавке чугуна требует организации совместного сжигания кокса и природного газа. Такая организация процессов сжигания двух различных видов топлива позволяет обеспечивать подачу дополнительной тепловой энергии непосредственно в зону получения расплава.

Процесс организации слоевого горения газо-воздушной смеси в плотном слое кусковых материалов можно представить как ряд последовательно проходящих стадий. Прежде всего, поток смеси газов, попадая в плотный слой шихты и сталкиваясь с твердыми кусками шихты, подвергается дополнительной турбулизации [16], что улучшает перемешивание природного газа и воздуха. Одновременно с указанным явлением происходит нагрев холодной газо-воздушной смеси в опускающемся нагретом слое кусковых материалов. При этом существенного охлаждения шихты не происходит. Для устойчивого зажигания газо-воздушной смеси в плотном слое целесообразно при подаче ее в разогретый слой поддерживать общий коэффициент расхода воздуха не ниже 2,5–3,0.

Горение в слое холодной газо-воздушной смеси с повышенными значениями коэффициента расхода воздуха может быть организовано только, при обеспечении ее предварительного подогрева. Эти условия создаются при формировании холостой колоши, когда температура кусков кокса по всей ее высоте становится стабильной, а процесс горения кокса осуществляется в верхней части выше места установки воздушных фурм. В условиях стабильности процесса горения кокса холодная газо-воздушная смесь, проходя через горячий слой кокса холостой колоши, подогревается до температуры воспламенения и образует высокотемпературную зону горения природного газа с температурой горения до 1350–1380 °С непосредственно в слое протяженностью 60–70 мм. При повышенных значениях коэффициента расхода воздуха уровень предварительного подогрева газо-воздушной смеси для организации самостоятельного горения должен быть выше температуры воспламенения твердого топлива 700–800 °С [17, 18] и составляет 850–1050 °С. Воздушное дутье, предназначенное для горения кокса, проходя через эту область горения природного газа, подогревается до 250...300 °С.

В промышленных условиях были зафиксированы результаты работы одной и той же вагранки, реализующей традиционный способ отопления на коксе и исследуемый способ отопления с использованием добавок природного газа. Сравнение показателей работы чугунолитейной вагранки в этих условиях приведены в табл. 1. Их анализ показал, что применение слоевого способа сжигания природного газа для отопления чугунолитейной вагранки обеспечивает повышение производительности плавильного агрегата с 10 до 13,6 т/ч или на 36 %. При этом удельный расход кокса сократился на 80 кг/т или на 33,3 %.

Таблица 1

Усредненные показатели работы чугунолитейной вагранки

Показатели работы	Традиционный режим	Режим при слоевом способе сжигания природного газа
Производительность по чугуну, т/ч	10,0	13,6
Удельный расход кокса, кг/т чугуна	240	160
Температура перегрева расплава, °С	1450	1440
Средний состав отходящих газов, %		
CO	12,05	8,9
CO <sub>2</sub>	18,80	13,61
SO <sub>2</sub>	0,10	0,08
N <sub>2</sub>	66,65	75,26
H <sub>2</sub> O	2,40	2,24
Коэффициент расхода воздуха, доли ед	0,63	1,05
Расход шихтовых материалов, кг/100кг:		
Отходы собственного производства	40	40
Покупной чугун	40	40
Стальной лом	20	20
Ферромарганец	1,0	1,0
Ферросилиций	5,4	5,4
Известняк	3,88	3,576
Основность шлака, доли ед.	0,69	0,74

Совмещение сжигания кокса и природного газа непосредственно в слое шихты с технологическим процессом нагрева и плавления материалов открывают возможность значительного улучшения управляемости качеством готовой продукции в результате тепловой обработки без существенных капитальных затрат.

Материальные балансы плавов, отражающие работу вагранки при отоплении ее только коксом (К) и с применением добавок природного газа (коксогазовое отопление – КГ), представлены в табл. 2. Сравнительный анализ этих данных показал, что при использовании слоевого способа сжигания природного газа в коксовой вагранке увеличивается удельный расход воздушного дутья на 3,7 % (отн.) при снижении общей массы материалов, участвующих в процессе на 3,01 % (отн.) в основном за счет снижения расхода кокса. Следует также отметить повышение выхода чугуна на 3,1% (отн.) при сокращении выхода шлака на 9,87 % (отн.) и колошниковогаза на 10,58 % (отн.). Образующаяся при этом невязка баланса связана с неравномерностью тепловой работы вагранки в горизонтальном сечении ее рабочего пространства.

Таблица 2

Материальные балансы ваграночных плавов на 100 кгчугуна

Статьи прихода	Масса				Статьи расхода	Масса			
	К		КГ при слоевом сжигании газа			К		КГ при слоевом сжигании газа	
	Кг	%	Кг	%		Кг	%	Кг	%
1. Металлическая шихта	100,00	38,68	100,00	39,88	1. Жидкий чугун	99,357	38,44	99,36	39,63
2. Кокс	24,0	9,28	16,00	6,38	2. Шлак	10,222	3,95	8,93	3,56
3. Природный газ	0	0	0,53	0,21	3 Колошниковый газ	168,61	65,23	146,25	58,33
3. Известняк	3,89	1,50	3,58	1,43	4. Невязка	-19,70	-7,62	-3,81	-1,52
4. Оплавленная футеровка (в шлак)	0,8	0,30	0,8	0,31					
5. Песок шихты	0,5	0,19	0,5	0,20					
6. Воздух дутья	129,32	50,05	129,32	51,90					
ИТОГО	258,51	100,00	250,73	100,0	ИТОГО	258,49	100,00	250,73	100,00

Тепловые балансы ваграночных плавов чугуна рассчитаны на основании данных материальных балансов. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Из анализа представленных данных следует: общий расход тепловой энергии в ваграночном процессе при использовании слоевого способа сжигания природного газа сокращается с 133,12 кВт до 108,12 кВт на каждые 100 кг полученного чугуна, т.е. на 18,78 %. Следствием этого результата является увеличение теплового КПД процесса выплавки чугуна с 35,58 % до 42,26 % или на 15,81 %. При этом доля тепловой энергии, получаемой в результате горения кокса сокращается с 92,16 до 88,05 %, т.е. на 4,46 % за счет более эффективного совместного сжигания твердого и газообразного топлива.

По результатам плавки при переходе на использование совместного слоевого сжигания природного газа и кокса холостой колоши было отмечено увеличение доли физического теплосодержания чугуна с 27,53 до 36,64 % или на 33,09 %, доли физического теплосодержания шлака с 3,75 до 4,03 % или на 7,47 отн. %.

Следует также отметить уменьшение доли физической теплоты отходящих газов с 24,72 до 18,12 % или на 26,7отн. %, а также химической теплоты ваграночных газов (химический недожог) с 34,66 до 31,64 % или на 8,71 %, что связано с более полным завершением процессов горения и тепло-массообмена в слое.

Таким образом, использование природного газа при отоплении шахтных печей ваграночного типа позволяет существенно воздействовать на показатели их работы, улучшая

процесс переплава исходных компонентов и обеспечивая более полное использование тепловой энергии. При этом достигают снижения удельного расхода твердого топлива (кокса) на 15...20 %. При сохранении удельного расхода кокса может быть повышена производительность вагранки на такую же величину.

Таблица 3

Тепловые балансы ваграночной плавки на 100кгчугуна

Статьи прихода	Количество теплоты				Статьи расхода	Количество теплоты			
	К		КГ при слоевом сжигании газа			К		КГ при слоевом сжигании газа	
	кВт	%	кВт	%		кВт	%	кВт	%
1. Теплота от сгорания кокса	122,69	92,16	95,20	88,05	1. Физическая теплота жидкого чугуна	36,65	27,53	36,64	33,88
2. Теплота от сгорания природного газа	0	0	7,35	6,80	2. Теплота расплавления и перегрева шлака	4,99	3,75	4,36	4,03
2. Окисление примесей чугуна, в т.ч	4,74	3,56	4,74	4,42	3. Теплота разложения известняка	4,37	3,28	4,02	3,72
железо	0,31	0,23	0,31	0,29					
кремний	3,96	2,97	3,96	3,66					
марганец	0,47	0,35	0,47	0,47					
3. Теплота шлакообразования	0,95	0,73	0,83	0,73	4. Теплота испарения влаги кокса	0,55	0,41	0,43	0,40
Всего	133,12	100,0	108,12	100,0	5. Теплота испарения влаги дутья	0,81	0,61	0,81	0,75
					6. Физическая теплота отходящих газов	32,91	24,72	19,59	18,12
					7. Химическая теплота ваграночных газов	46,14	34,66	34,21	31,64
					8. Потери теплоты в окр. среду	6,14	4,61	6,14	5,68
					Невязка	0,56	0,43	1,92	1,78
					Всего:	133,12	100,0	108,12	100,00

Относительная простота реализации процесса сжигания газа в плотном слое открывает широкие возможности его применения для интенсификации процессов тепло-массообмена в шахтных печах ваграночного типа.

#### Список использованных источников

1. Матюхин В.И., Матюхина А.В. Расчет и проектирование ваграночного комплекса плавки чугуна. Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 364 с.



2. Селянин И.Ф. Экспериментальное исследование газообразования в слое кокса холостой колоши вагранки с расширенной зоной горения / И.Ф. Селянин, Г.Л. Маркс, Л.М. Вальдман, Б.М. Соколов // Изв. вузов. Черная металлургия. 1991, №10. – С. 74–77.
3. Гордон Я.М. Тепловая работа шахтных печей и агрегатов с плотным слоем / Я.М.Гордон, Б.А.Боковилов, В.С.Швыдкий [и др.]. – М.: Металлургия, 1989. – 120 с.
4. Математическое моделирование газового потока, зависящего от конструкционных параметров шахтной печи. Dongbei daxue xuebao. Ziran kexue ban. J. Northeast. Univ. Natur. Sci. 2013. 34, N 7, с. 980–984. Кит.; рез. англ.
5. Чаплыгин Ю.В. Использование природного газа при плавке чугуна / Ю.В. Чаплыгин, А.Е. Еринов. – Киев: Наукова думка, 1976. – 237 с.
6. Natsui, S., Kon, T., Ueda, S., Kano, J., Inoue, R., Ariyama, T., Nogami, H. Analysis of heat and mass transfer in a packed bed by considering particle arrangement (Article). Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials(IMRAM), Tohoku University, 2–1–1 Katahira Aoba-ku Sendai 980–8577, Japan.
7. Фуклеев В.А. О работе коксо-газовых вагранок // Литейное производство, 1964. – № 8. – С. 34–35.
8. Энергосбережение в промышленности и эксергетический анализ технологических процессов / Э.Э.Меркер, Г.А.Карпенко, И.М.Тынников. Старый Оскол: ТНТ, 2010. – 316 с.
9. Часов Л.И. Обобщение некоторых данных о плавке чугуна на коксо-газовых вагранках / Л.И. Часов, Л.П. Протопопов // ВНИИТИиЭПСМ: сб.тр. – 1971. – вып. 3. – С. 346–349.
10. Светлов Ю.В. Интенсификация тепловых и гидродинамических процессов в аппаратах с турбулизаторами потока. Теория, эксперимент, методы расчета. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 304 с.
11. Лисиенко В.Г. Теплофизика металлургических процессов / В.Г. Лисиенко, В.И. Лобанов, Б.И. Китаев. – М.: Металлургия, 1982. – 240 с.
12. Лобанов В.И. Исследование условий формирования зоны горения в слое железорудных окатышей для улучшения их металлургических свойств / В.И. Лобанов, В.И. Матюхин, В.А. Гольцев, Ю.Г. Ярошенко // Изв. вузов. Черная металлургия. 1987. № 6. – С. 103–104.
13. Теория и практика интенсификации технологического процесса в шахтных агрегатах малого диаметра / И.Ф.Селянин, А.В.Феоктистов, С.А.Бедарев. – М.: Теплотехник, 2010. – 379с.
14. Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Тепломассоперенос: учебник для вузов / Под ред. Ю.Г.Ярошенко. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 455 с.
15. Швыдкий В.С. Механика жидкости и газов. /В.С.Швыдкий, Ю.Г.Ярошенко, Я.М.Гордон [и др.]; под ред. В.С.Швыдкого. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 464 с.
16. Гуцин С.Н. Теория и практика теплогенерации / С.Н.Гуцин, М.Д.Казяев, Ю.В.Крюченков; под ред. В.И.Лобанова, С.Н.Гущина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 379 с.
17. Лисиенко В.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: справочное издание / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев. – М.: Теплотехник, 2002. – 688 с.
18. Равич М.Б. Поверхностное беспламенное горение / М.Б. Равич. – М.–Л.: АН СССР, 1949. – 353 с.